

文章编号: 2095-4980(2021)05-0769-10

## 太赫兹频段波导滤波器的研究进展

张沁旖<sup>a</sup>, 闫玉涛<sup>a</sup>, 丁江乔<sup>\*b</sup>

(南京信息工程大学 a.长望学院; b.电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044)

**摘要:** 太赫兹波因其独特的频谱特性, 在天文观测、星际通信、国防安全等领域有着重要的交叉前沿应用。滤波器作为太赫兹探测/通信系统中关键器件之一, 能够提取特征信号并抑制干扰频率, 提高系统的目标探测性能。近年来, 得益于高精度制备工艺的快速发展, 太赫兹波导滤波器的研究进展已取得突破性成果, 基于不同类型、结构、工艺的太赫兹波导滤波器被深入研究。该综述从太赫兹频段加工工艺方面入手, 阐述了太赫兹频段波导滤波器的发展现状和普遍问题, 并总结了主流工艺下滤波器的优缺点, 为太赫兹高性能波导滤波器的进一步发展提供参考。

**关键词:** 太赫兹; 波导; 滤波器

**中图分类号:** TN713

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2021246

## Review of terahertz waveguide filters research process

ZHANG Qinyi<sup>a</sup>, YAN Yutao<sup>a</sup>, DING Jiangqiao<sup>\*b</sup>

(a.Changwang School of Honors; b. School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing Jiangsu 210044, China)

**Abstract:** Terahertz waves with unique spectrum characteristics have provided important applications in cross frontier fields of astronomical observation, interstellar communication and defense security. As one of the key components in the terahertz detection/communication systems, the filter can extract characteristic signals and suppress interference frequencies to improve the target detection performance of the system. In recent years, thanks to the development of the high-precision manufacturing process, some breakthrough results have been achieved in terahertz waveguide filters. And the filters based on different types, structures and processes have been studied. In this review paper, the development status and common problems of terahertz waveguide filters are expounded based on the different processes. The advantages and disadvantages of filters developed by mainstream technologies are also summarized, which can provide a reference for the further development of terahertz waveguide filters with high performance.

**Keywords:** terahertz; waveguide; filter

太赫兹(THz)频段是指频率范围在 0.1~10 THz 区间的电磁波, 覆盖毫米波、亚毫米波至远红外波段, 拥有独特的光子学和电子学特性, 是重要的交叉前沿研究领域<sup>[1]</sup>。由于信号源和探测器等核心器件的匮乏, 该频段仍存在丰富未被充分开发的频谱资源。近年来, 随着太赫兹各类元器件的快速发展, 太赫兹频段在天文观测、高速通信和雷达成像等众多领域均展现出巨大的应用前景<sup>[2-4]</sup>。现代太赫兹探测、通信、雷达等系统与应用的兴起, 同时促进了大量太赫兹关键器件的研究, 主要包括: 天线<sup>[5]</sup>、传输线<sup>[6]</sup>、滤波器<sup>[7]</sup>、耦合器<sup>[8]</sup>、混频器<sup>[9]</sup>、倍频器<sup>[10]</sup>、放大器<sup>[11]</sup>等。毫无疑问, 这些关键器件的性能优劣直接决定了系统的发展。因此, 太赫兹若干关键器件技术的研究是该领域的一个重要研究方向。

滤波器具有频率选择、优先提取特征信号等性能, 能够滤除工作频带外的干扰信号和噪声, 获取有效电磁频谱信息。作为太赫兹探测/通信系统收发前端中的关键器件之一, 太赫兹滤波器在谐波抑制、镜频干扰等方面发挥着至关重要的作用, 是系统中不可或缺的组成部分。迄今, 太赫兹滤波器的研究方向主要有 2 类: 一是基于光子学的方法, 如利用新型电磁材料<sup>[12]</sup>及超材料薄膜特性<sup>[13]</sup>等实现滤波功能, 此类型的滤波器因其结构特点, 主

收稿日期: 2021-05-11; 修回日期: 2021-07-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12003011); 江苏省高等学校自然科学基金资助项目(20KJB510039)

\*通信作者: 丁江乔 email:jqding@nuist.edu.cn

要应用于自由空间的频谱选择,不易于与探测等电路系统集成;二是基于电子学微波滤波器理论,采用经典的微带、共面波导(Coplanar Waveguide, CPW)等平面传输线或矩形波导传输线,实现电路系统中的滤波功能。在太赫兹频段,微带<sup>[14]</sup>和共面波导<sup>[15]</sup>往往需要采用超导材料<sup>[16]</sup>、特殊结构或新型微纳工艺,在降低部分损耗的同时获得高性能太赫兹平面滤波器。此类太赫兹滤波电路易于薄膜工艺实现和集成,但依然存在导体损耗、介质损耗、辐射损耗等,导致  $Q$  值低(仅约数十量级),插入损耗大。而矩形波导传输线具有完全闭合的金属空腔结构,能够避免高频段电磁辐射损耗和介质损耗,具有高  $Q$  值(约数百量级)、低损耗、高选择性、易安装固定、易连接等优点,已成为太赫兹频段发射机、接收机<sup>[9]</sup>系统电路实现的首选,亦成为太赫兹滤波器<sup>[7]</sup>结构的首选传输线结构。目前波导结构已经能够普遍应用到毫米波段的滤波器设计中,但对于更高频的亚毫米波、太赫兹频段,工艺制备精确度是其发展的瓶颈。近年来,随着微电机系统(Micro-Electromechanical Systems, MEMS)等加工工艺的快速发展,物理尺寸小等制约太赫兹波导滤波器发展的因素已被突破,基于不同类型、结构、工艺的太赫兹波导滤波器已被广泛报道。太赫兹波导滤波器成为了国内外研究机构热门的研究对象,且种类繁多,性能各异。

本文从高精度制备工艺的角度出发,分类阐述太赫兹波导滤波器的发展现状,总结出主流工艺下太赫兹波段滤波器的结构、工艺及性能特点,为设计并制备高性能太赫兹波导滤波器提供结构和工艺的选择思路,并为太赫兹高性能滤波器的进一步发展提供基础。

## 1 基于 CNC 加工的太赫兹波导滤波器

太赫兹频段因其波长短,该频段波导滤波器的物理尺寸非常小,需要制备工艺误差达微米( $\mu\text{m}$ )量级,因此对工艺条件提出高要求。随着光刻技术飞速发展,高精度 MEMS 技术已成为主流太赫兹滤波器的制备工艺<sup>[17-19]</sup>,典型的有深层离子蚀刻技术(Deep Reactive Ion Etching, DRIE)、厚 SU-8 光刻技术(Thick SU-8 Photoresist)、紫外光刻工艺(UV-LIGA)等。为了实现微工艺 MEMS 下波导滤波器的实际测量、精准定位、与固态系统互连等需求,需要额外设计高精度度固态装配 Block、 $H$ -面弯头、法兰接头等结构,而这类结构与滤波器的装配均会带来损耗的增大,目前基于 MEMS 工艺实现的太赫兹波导滤波器的损耗特性普遍不出色。相较于 MEMS 技术,现代计算机数控机床(Computer Numerical Control, CNC)铣削技术的误差要逊色一些,但经过近几十年的发展,加工误差能够达到 $\pm 10 \mu\text{m}$ 以内<sup>[7]</sup>,国际上最先进的 CNC 工艺误差甚至达到 $\pm 2.5 \mu\text{m}$ ,并能够制备出高达 700 GHz 的高性能波导滤波器<sup>[20]</sup>;此外,使用 CNC 加工的波导滤波器具有高鲁棒固态特性,并易于集成标准法兰,方便与其他测试、电路等系统形成互连,同时能获得比较出色的插损特性。本节内容将重点归纳讨论基于 CNC 加工的太赫兹波导滤波器。

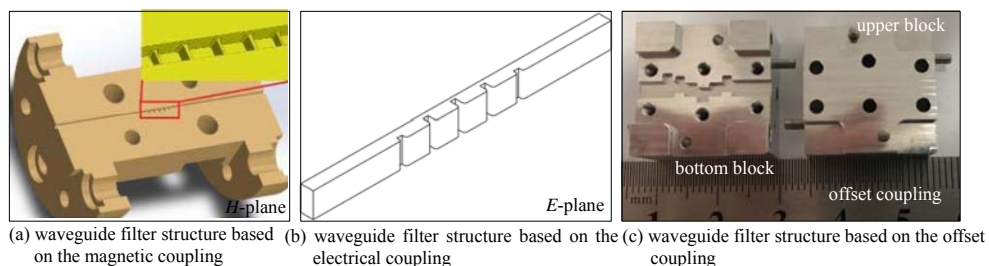


Fig.1 Waveguide filter structures based on the magnetic coupling, the electrical coupling and the offset coupling  
图 1 基于磁耦合、电耦合和偏移耦合结构的波导滤波器

$\text{TE}_{101}$  模谐振腔一直以来都是设计波导滤波器的基本谐振单元,因此现阶段报道的大部分太赫兹波导滤波器均采用了该类型谐振腔结构,同时结合包括磁耦合、电耦合、偏移耦合等在内的直接耦合方式,基于高精度 CNC 工艺实现,进而获得经典的切比雪夫函数响应。典型的有 W-波段(75~110 GHz)、W-R3 波段(220~330 GHz)、WR-2.8 波段(260~400 GHz),甚至高达 WR-1.5 波段(500~750 GHz)的带通波导滤波器<sup>[20-26]</sup>,此类滤波器的部分结构如图 1 所示<sup>[21,22,25]</sup>,性能对比见表 1,基本能够获得低插损、宽频带等性能,实现方式主要有  $H$ -面磁耦合、 $E$ -面电耦合、偏移磁耦合等。

然而,具有切比雪夫响应的滤波器的频率响应过渡缓慢,尤其是波导高阶谐振/传输模式的存在会导致滤波器的上边带抑制较差。为了获得更好的频率选择特性,常规采用增加滤波器阶数的方法,但会直接导致滤波器的体积增加、损耗增大等。因此,引入交叉耦合、额外谐振抑制等方法,产生有限传输零点,实现具有广义切比雪夫(准椭圆)响应的滤波器,从而能在不增加谐振器阶数的前提下提高滤波器的响应陡峭度。典型的有 W-波段四阶准椭圆波导滤波器<sup>[27]</sup>,通过交叉耦合和源-负载耦合的引入,在带外产生了 2 对传输零点,有效改善了滤波器的

带外抑制特性；并对其结构做简化，拓展到 220 GHz 频段，扩大其在太赫兹探测系统中的应用，获得了具有 2 个传输零点的 220 GHz 准椭圆波导滤波器<sup>[28]</sup>。文献[29]提出了用额外谐振极点结构来产生传输零点的方法，结合 3 个普通谐振腔，实现了 4 阶 W 波段准椭圆滤波器。此类滤波器的主要结构如图 2 所示，性能对比见表 1，均能够获得低插损、1 个以上传输零点等高性能。

表 1 基于 CNC 工艺的太赫兹波导滤波器性能汇总表  
Table 1 Performance summary of THz waveguide filters based on the CNC technology

working band	center frequency/ GHz	3 dB FBW/%	filter order	RL/dB	IL/dB	response type	TZs No.	structure	Ref.	Tech.
W-band	92.6	4.5.0	4	15	0.41	Chebyshev	—	H-plane coupling	[21]	CNC
	91.3	13.00	4	21	0.30			E-plane coupling	[22]	
	92.5	20.00	5	15	0.60			offset-coupling	[23]	
WR-5	179	8.70	8	18	0.34	Chebyshev	H-plane coupling	[24]		
WR-3	255	11.00	5	15	3.90			[25]		
WR-2.8	340	5.30	4	20	0.60			[26]		
WR-1.5	690	—	—	20	2.10			H-plane E-plane	[20]	
W-band	92.6	5.50	4	15	1.20	quasi-elliptic	4	cross-coupling	[27]	
	100	10.00	4	18	0.60		1	extracted pole	[28]	
	WR-4	214	9.80	4	15		0.60	2	cross-coupling	
W-band	100	6.00	4	13	0.50	Chebyshev dual band	—	TM <sub>120</sub> -mode	[30]	
	—	2.70	6	15	1.50		4	TE <sub>201</sub> -mode	[31]	
D-band	140	9.29	4	18.9	0.52	quasi-elliptic	2	TE <sub>301</sub> -mode	[32]	
	140	17.00	2	12.5	0.33		2	mixed-mode	[33]	
WR-3	258	8.80	4	15	0.70	quasi-elliptic	2	TE <sub>102</sub> -mode	[7]	
	256	9.80	4	20	0.50		2	over-mode	[7]	
WR-2.2	390	12.00	3	15	1.50	quasi-elliptic	1	mixed-mode	[34]	
	394	9.00	3	15	1.50		3			

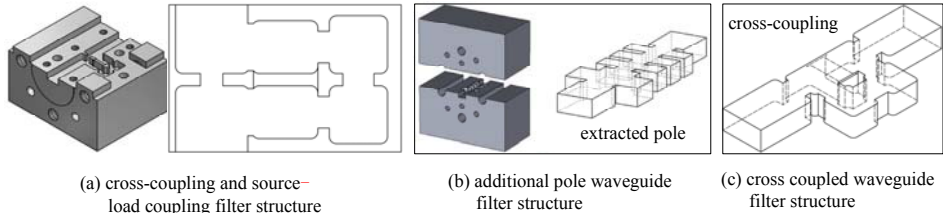


Fig.2 Waveguide filters with cross couplings or additional poles

图 2 交叉耦合、额外极点波导滤波器结构

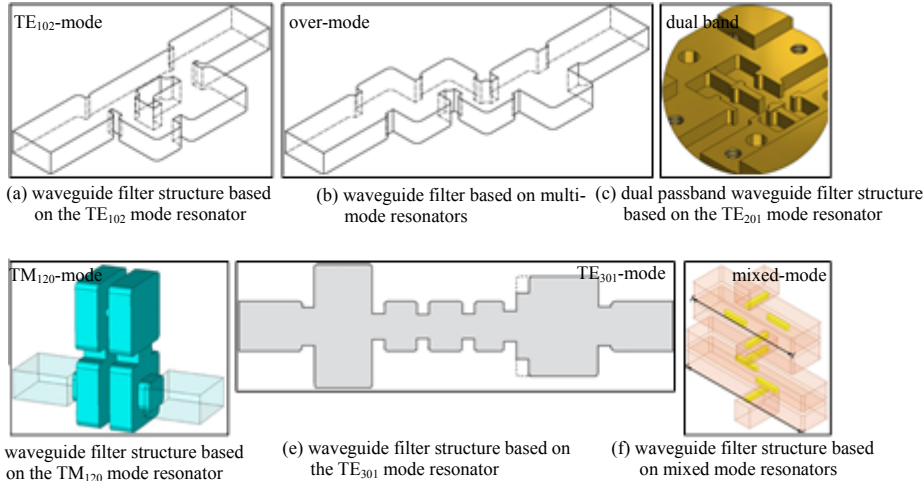


Fig.3 THz waveguide filter structures based on the higher order modes

图 3 高阶模太赫兹波导滤波器结构

另一方面，基于高阶模如 TE<sub>102</sub> 模、TE<sub>103</sub> 模、TM<sub>120</sub> 模等的谐振腔，具有尺寸大、容差小、Q 值高等特点，非常适用于太赫兹波导滤波器的设计，不仅有益于降低太赫兹波导滤波器结构加工的复杂度，降低高频段误差对性能的敏感度，而且能够提供模式间耦合特性，形成传输零点，提高带外抑制等。因此近年来，具有大尺寸结构的高阶模谐振腔被广泛用于太赫兹滤波器的设计<sup>[7,30-34]</sup>。典型的设计如下：文献[30]中提出利用 TM<sub>120</sub> 模谐振腔实现四阶波导滤波器结构，相较于传统的 TE<sub>101</sub> 模，该腔体具有更大的尺寸和更小的纵横比，有利于高频段的加工；文献[7,31]中，TE<sub>102</sub> 模谐振腔不仅用于实现双频带的响应<sup>[31]</sup>，其磁场反转特性亦被用于准椭圆滤波器中负交叉耦合的实现<sup>[7]</sup>，而且与腔内 TE<sub>101</sub> 模一起被用于构成 singlet，形成传输零点；类似的原理，基于 TE<sub>301</sub> 模的 singlet

也被研究并用于高频滤波器设计<sup>[32]</sup>；文献[33]中，腔体内部更多的  $TE_{2N,1,0}$  模( $N=2,3,4,\dots$ )被利用到太赫兹准椭圆滤波器的设计中，仅使用 2 个多模谐振腔即可实现多阶的高性能响应，大大降低了太赫兹波导型滤波器 CNC 工艺制备的难度。此类滤波器的主要结构如图 3 所示，腔体结构的大尺寸能有效降低 CNC 工艺的误差敏感性；性能对比见表 1，同样能够获得低插损性能、具有 1 个以上传输零点的准椭圆响应；此外旁路耦合的结构特点易于实现零点位置可控<sup>[7,32]</sup>。

综上，得益于现代高精度 CNC 工艺的发展，结合高阶模谐振腔、腔体耦合结构等易加工的特点，400 GHz 以下频段波导滤波器能够被有效制备，实现低损耗、准椭圆、双通带等高性能，并能够被应用于太赫兹固态探测、通信、雷达等系统中。但是目前 CNC 工艺因其精确度不够、精密钻头成本过高等问题，并不适合太赫兹高频段波导滤波器的加工，而且铣削制造方式具有一定的特殊性，同样限制了太赫兹波导滤波器的结构多样性。

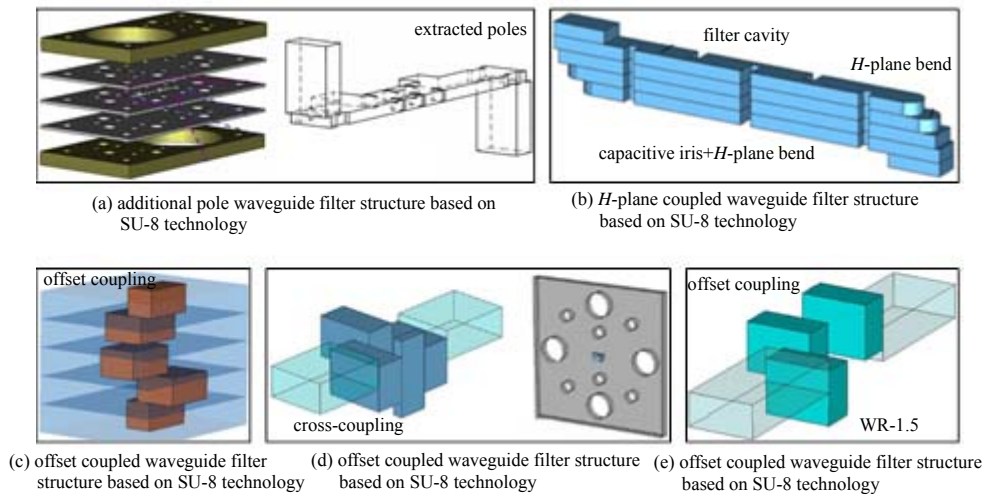


Fig.4 THz waveguide filters based on the SU-8 micro-technology

图 4 基于 SU-8 微工艺的太赫兹波导滤波器

## 2 基于 SU-8 微工艺的太赫兹波导滤波器

近年来，厚 SU-8 光刻胶及光刻技术被利用到太赫兹波导滤波器的制备中，基于多层结构的 SU-8 工艺能够实现高达 20:1 的纵横比、高精度微米量级的误差和几十纳米以内的表面粗糙度。相较于 CNC 机械加工技术，该技术具有批量化低成本生产、批次内高质量一致性、高精度光刻工艺、侧壁精确度小于 40 nm 等优点，同时具有易于同批次光刻不同复杂结构、多元阵列结构等特点，因此备受关注。此外，结合分层耦合结构特点，使用 SU-8 加工的太赫兹波导滤波器能够获得准椭圆响应、层间集成等高频特性。本节内容将重点归纳讨论基于厚 SU-8 工艺的太赫兹波导滤波器。

表 2 基于 SU-8 工艺的太赫兹波导滤波器性能汇总表

Table2 Performance summary of terahertz waveguide filters based on the SU-8 technology

working band	center frequency/GHz	3 dB FBW/%	filter order	RL/dB	IL/dB	response type	TZs No.	structure	Ref.	Tech.
W-band	100.0	5.0	4	10	1.20	quasi-elliptic	2	extracted poles	[35]	SU-8
	88.0	9.7	4	15	1.00				[36]	
	293.2	8.8	4	16	3.30	Chebyshev	—	capacitive iris	[37]	
300.0	9.0	5	10	2.20	[18]					
309.0	3.3	3	15	0.40	offset coupling			[38]		
WR-3	298.6	5.3	3	16	0.45	quasi-elliptic	2	cross-coupling	[39]	SU-8
	671.0	8.0	3	10	1.75	Chebyshev	—	offset coupling	[40]	

在利用 SU-8 技术设计并制备太赫兹波导滤波器方面，英国伯明翰大学 SHANG X B 等具有丰富的经验，提出多款 W-波段至 WR-1.5 频段的滤波器结构<sup>[36-40]</sup>，此类滤波器的主要结构形式如图 4 所示，性能对比见表 2。总结为以下几种典型：利用非对称电容耦合结构实现切比雪夫滤波器响应，提高虹膜间距及鲁棒性，结合额外的 H-面弯头设计，实现 W-波段波导滤波器结构<sup>[36]</sup>；进行便于对称连接测试的 H-面弯头设计，并拓展至 WR-3 频段，得到高频段应用<sup>[37]</sup>；其次，考虑到 SU-8 的分层式工艺特点，偏移耦合谐振腔结构被采用，并利用 3 层 SU-8 结构，成功在 WR-3 频段和 WR-1.5 频段实现<sup>[38,40]</sup>；最后，额外谐振抑制、交叉耦合实现传输零点的方法同样被引入，并利用 SU-8 光刻工艺实现准椭圆响应波导滤波器<sup>[35,39]</sup>。此外，上述文献还比较了使用单层、双层及三层 SU-8

工艺下的滤波器性能，获得结论为多层数工艺结构能有效降低滤波器的损耗特性。

综上，厚 SU-8 光刻技术的出现使得批量工艺制备得以实现，结合特殊腔体耦合方式、分层型结构特点，WR-3、WR-1.5 等高频段波导滤波器能够被有效加工，实现低阶数、低损耗、准椭圆等高性能，并被集成应用到 3 倍频器电路系统<sup>[41]</sup>中。但是为了实现可靠、精准的固态装配性，*H*-面弯头、带法兰接头的固定装置等必不可少，且均会带来额外的损耗；另外，SU-8 光刻胶的表面不平整会导致层与层之间有缝隙，进而导致该工艺制备的滤波器往往频率偏移较大。

### 3 基于 DRIE 工艺的太赫兹波导滤波器

在太赫兹高频段波导滤波器的制备工艺方面，DRIE 技术得到广泛采用，该技术能够实现接近 90°垂直的侧壁、高纵横比及高精度微米级的可控误差，已成为现代 MEMS 工艺中最为流行的技术。相较于 CNC 机械加工技术，该工艺具有批次内高质量一致性、高精度多次刻蚀成型、易实现多台阶型腔体结构、阵列结构易一次成型等优点；相较于 SU-8 微工艺技术，DRIE 工艺具有更高的灵活性，包括蚀刻速率、深度、台阶可控。此外，结合绝缘体上硅(Silicon-On-Insulator, SOI)基片，DRIE 工艺能够制备出具有极低插损的高频波导结构，典型的如 220~330 GHz 频段直波导，其损耗低至 0.02 dB/mm<sup>[42]</sup>；结合特殊结构的高阶模谐振腔结构，使用 DRIE 工艺制备的太赫兹波导滤波器也能获得高性能准椭圆响应。本节将重点归纳讨论基于硅基 DRIE 工艺的太赫兹波导滤波器。

表 3 基于 DRIE 工艺的太赫兹波导滤波器性能汇总表  
Table 3 Performance summary of terahertz waveguide filters based on the DRIE technology

working band	center frequency/GHz	3 dB FBW/(%)	filter order	RL/dB	IL/dB	response type	TZs No.	structure	Ref.	Tech.
D-band	140	10.40	5	10	0.61	Chebyshev	—	<i>H</i> -plane coupling	[43]	DRIE
G-band	174	5.50	—	15	2.00				<i>E</i> -plane coupling	
J-band	240	6.30	2	10	2.00			<i>H</i> -plane coupling		
WR-2.2	385	3.90	2	10	2.70				[46]	
	570	8.77	3	10	0.90			[17]		
WR-1.5	550	6.00	5	10	2.50	<i>H</i> -plane <i>E</i> -plane	[47]			
	640	6.25	5	13	1.00					
WR-2.2	360	5.50	2	13	2.00	Chebyshev	—	circular cavity	[48]	
	400	7.50	2	20	2.84	quasi-elliptic	2	elliptic cavity	[49]	
WR-1.0	1 017	2.16	4	10	1.90	quasi-elliptic	1	TE <sub>301</sub> /TE <sub>102</sub> dual-mode	[50]	
WR-3	270	1.85	4	15	1.21	quasi-elliptic	2	quasi-TM <sub>110</sub>	[51]	
WR-2.2	450	1.00	2	15	2.60	Chebyshev	—	TE <sub>101</sub> mode	[52]	
			2	15	2.32			TM <sub>110</sub> dual-mode		

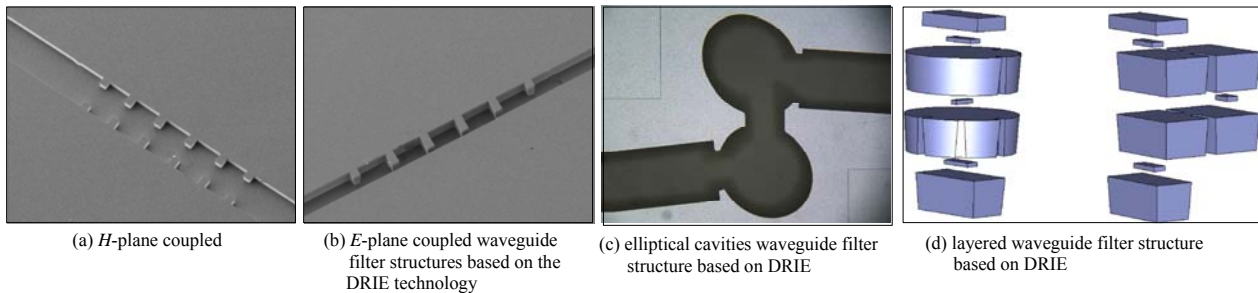


Fig.5 THz waveguide filters based on the DRIE technology

图 5 基于 DRIE 工艺的太赫兹波导滤波器

现已有大量基于传统的线性耦合式滤波器结构，利用 DRIE 技术的太赫兹高频段波导滤波器被制备并报道<sup>[17,43-47]</sup>，典型的高频段 *H*-面、*E*-面耦合滤波器刻蚀结构如图 5 所示，性能对比见表 3。此类文章的基本出发点是利用 DRIE 工艺将传统低频段波导滤波器拓展至太赫兹高频段，如 WR-2.2 波段、WR-1.5 波段等，保持原有的切比雪夫函数响应不变。在基于 DRIE 工艺的太赫兹多模谐振腔滤波器方面<sup>[48-50]</sup>，东南大学 HONG W 团队等均有相关代表成果，如使用高 *Q* 值的圆形双模和椭圆形准—TM<sub>110</sub> 模腔体谐振器，实现了 WR-2.2 频段高性能滤波器。值得一提的是，在基于硅基深刻工艺实现高 *Q* 值波导滤波器方面，瑞典皇家理工学院 OBERHAMMER J 团队走在前列，已取得多个代表性成果<sup>[42,51,52]</sup>，包括：基于双 *H*-面分裂型波导结构，在 WR-3 频段实现迄今最低波导插损性能，仅为 0.02 dB/mm；基于 SOI 基片 DRIE 技术，提出高精度对准方法，实现了批量化的 WR-3 频段高 *Q* 值、窄带波导滤波器研制，*Q* 值高达 700 以上，相对带宽仅 1.85%；并基于同样的方法，实现了更高频 400 GHz 频段、高 *Q* 值、窄带波导滤波器，获得了目前报道的最佳性能，*Q* 值高达 786，相对带宽为 1%。

综上，得益于 DRIE 微工艺的快速的发展，500 GHz 以上太赫兹高频段波导滤波器结构得以成功制备，结合多模谐振腔结构等，同样能获得准椭圆响应等高性能，且能够制备出具有特殊形状、多阶段式腔体结构，具有高灵活、可控性；但因侧壁刻蚀陡峭度、刻蚀表面粗糙度、镀金工艺不均匀性等因素，目前基于 DRIE 工艺实现的太赫兹波导滤波器在插入损耗方面不如 CNC 技术。另外，滤波器与端口对准精确度、对准固定卡扣等因素均会导致该工艺下的滤波器实测频率偏移较大。

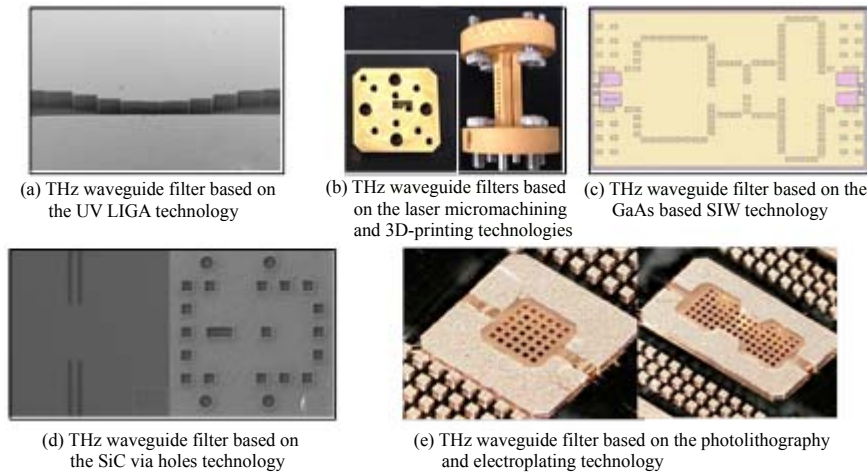


Fig.6 THz waveguide filters based on other micro processes  
图 6 基于其他微工艺的太赫兹波导滤波器

#### 4 基于其他工艺的太赫兹波导滤波器

除了上述工艺以外，本文还总结了基于其他微工艺制备的太赫兹频段波导滤波器<sup>[53-60]</sup>，主要包括湿法刻蚀 (Wet-etching)、电铸(Electroforming)、紫外光刻工艺(UV-LIGA)、3D 打印、SiC 基通孔技术等。典型工艺制备出的太赫兹波导滤波器性能对比见表 4，部分工艺下的结构如图 6 所示。首先，基于传统的直接线性耦合式滤波器结构，部分 W-波段波导滤波器被报道<sup>[53-56]</sup>，基本出发点是利用新型工艺技术针对低频段 W-波段结构进行了试验性验证。这类滤波器结构简单，实测性能一般。其中，电铸、激光、3D 打印等技术均能制备出低损耗性能滤波器，而湿法刻蚀、紫外光刻技术制备出的结构依然存在插损高的缺点。其次，经典的基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, SIW)结构被采用，结合印刷电路板<sup>[57]</sup>、砷化镓基板<sup>[58]</sup>、碳化硅(SiC)基板<sup>[59]</sup>等，利用通孔技术实现类 SIW 腔体结构滤波器。这类滤波器具有平面滤波器的特征，易于平面电路系统中的集成，且易实现多模谐振腔和准椭圆响应，但普遍存在 Q 值低(约 130)、插损高(3 dB 及以上)等缺点。其中，基于 SiC 薄膜的通孔技术成功实现了 185 GHz 频段高性能 SIW 滤波器。基于新型微工艺技术，文献[60]制备出了 2 阶高频 287 GHz 平面式波导滤波器结构，利用 CPW 实现输入、输出。该滤波器同样存在上述类 SIW 腔体结构的优缺点。

表 4 基于其他特殊工艺的太赫兹波导滤波器性能汇总表  
Table4 Performance summary of terahertz waveguide filters based on other special technologies

working band	center frequency/GHz	3 dB FBW/(%)	filter order	RL/dB	IL/dB	response type	TZs No.	structure	technologies	Ref.
W-band	94.0	1.3	2	15.0	1.75	Chebyshev	—	H-plane	wet-etching	[53]
	90.0	20.0	10	15.0	0.40			H-plane	electroforming	[54]
	100.0	1.7	4	1.5	2.00			E-plane	UV LIGA	[55]
	100.0	4.0	4	15.0	0.80	quasi-elliptic	—	—	laser micromachining	[56]
	87.5	11.5	5	18.0	0.50				3D-printing	[56]
	80.0	2.5	4	10.0	3.89				PCB-based	[57]
WR-5	93.0	3.4	4	13.5	4.30	quasi-elliptic	2	SIW	GaAs-based	[58]
	185.0	9.7	4	10.0	1.55				SiC via-holes	[59]
WR-3	287.0	3.5	2	18.0	4.60	Chebyshev	—	CPW	photolithography and electroplating	[60]

综上，相较于上述讨论的 3 种常用工艺技术，这一类滤波器结构简单，采用类似的微加工工艺实现，实测性能一般，且主要集中在 W-波段。同时，SIW 等平面波导结构工艺被采用，对后续实现滤波器与平面电路系统的集成提供了前期研究基础。

## 5 结论

太赫兹波的独特频谱特性使得太赫兹探测、通信等系统展现出了巨大的应用前景，同时对其关键器件之一的太赫兹高性能滤波器提出高要求。本文主要从太赫兹频段波导滤波器制备工艺方面入手，对近年来报道的太赫兹频段波导滤波器进行了归纳总结，进而为发展高性能太赫兹波导滤波器提供思路与参考。近年来，随着高精度 CNC 工艺的发展，400 GHz 以下频段多种腔体耦合结构、高阶模谐振腔耦合结构滤波器得到有效制备，并实现了低损耗、准椭圆、双通带等多重高性能；厚 SU-8 光刻技术的出现让批量化制备滤波器结构成为可能，该工艺能够可靠研制 WR-3、WR-1.5 等高频段波导滤波器，并实现低阶数、低损耗、准椭圆等高性能；DRIE 微工艺的快速发展，为 500 GHz 以上高频段波导滤波器的制备提供技术基础，不仅能够制备出特殊形状的多模谐振腔、多阶腔体耦合结构等，而且能够获得低损耗、准椭圆响应等高性能；湿法刻蚀、紫外光刻工艺、激光微工艺等技术的发展，同样为太赫兹滤波器的发展提供了技术基础，同时为太赫兹平面电路系统的集成提供了可能。

得益于制备工艺的发展，太赫兹波导滤波器研究近年来已取得了重大的突破，但依然存在结构单一、难以集成、工艺精确度不足、装配不稳定、实际性能偏差较大等问题，难以满足高性能系统对其提出的高要求，距离商业化存在较大差距。太赫兹波导滤波器始终朝着更高频段、更低插损、更陡峭选择性、固态易连接性、易于系统集成、可扩展性等多方向发展。

### 参考文献：

- [ 1 ] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002,50(3):910–928. doi:10.1109/22.989974.
- [ 2 ] SHI Shengcai, PAINE S, YAO Qijun, et al. Terahertz and far-infrared windows opened at Dome A in antarctica[J]. Nature Astronomy, 2016,1(1):1–7. doi:10.1038/s41550–016–0001.
- [ 3 ] 赵明明, 余建军. 太赫兹通信系统的研究现状与应用展望[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(6):931–937. (ZHAO Mingming, YU Jianjun. Research status and application prospect of terahertz communication system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(6):931–937.) doi:10.11805/TKYDA201806.0931.
- [ 4 ] 国爱燕, 高文军, 徐明明, 等. 星载太赫兹雷达碎片预警技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(2):172–177. (GUO Aiyun, GAO Wenjun, XU Mingming, et al. Debris warning technology of space borne terahertz radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(2):172–177.) doi:10.11805/TKYDA201702.0172.
- [ 5 ] ZHAO Yun. Quasi-corrugated substrate integrated waveguide *H*-plane horn antenna with wideband and low-profile characteristics[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-aided Engineering, 2019,29(2):e21539.1–e21539.6. doi:10.1002/mmce. 21539.
- [ 6 ] STÄRKE P, CARTA C, ELLINGER F. Direct chip-to-waveguide transition realized with wire bonding for 140–220 GHz G-band[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2020,10(3):302–308. doi:10.1109/TTHZ. 2020.2971690.
- [ 7 ] DING Jiangqiao, SHI Shengcai, ZHOU Kang, et al. WR-3 band quasi-elliptical waveguide filters using higher order mode resonances[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2017,7(3):302–309. doi:10.1109/TTHZ.2017.2686007.
- [ 8 ] DING Jiangqiao, ZHAO Yun, GE Junxiang, et al. A 90° waveguide hybrid with low amplitude imbalance in full W-band[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2019,40(4):429–434. doi:10.1007/s10762–019–00577–1.
- [ 9 ] TREUTTEL J, GATILOVA L, MAESTRINI A, et al. A 520–620 GHz Schottky receiver front-end for planetary science and remote sensing with 1 070–1 500 K DSB noise temperature at room temperature[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2015,6(1):148–155. doi:10.1109/TTHZ.2015.2496421.
- [ 10 ] DING Jiangqiao, MAESTRINI A, GATILOVA L, et al. A 300 GHz power-combined frequency doubler based on *E*-plane 90°-hybrid and Y-junction[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2020,62(8):2683–2691. doi:10.1002/mop.32146.
- [ 11 ] CAI Jun, WU Xianping, FENG Jinjun. Traveling-wave tube harmonic amplifier in terahertz and experimental demonstration[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014,62(2):648–651. doi:10.1109/TED.2014.2377914.
- [ 12 ] LI Jiusheng. Terahertz wave narrow bandpass filter based on photonic crystal[J]. Optics Communications, 2010,283(13):2647–2650. doi:10.1016/j.optcom.2010.02.046.
- [ 13 ] CHIANG Yiju, YANG Chanshan, YANG Yuhang, et al. An ultrabroad terahertz bandpass filter based on multiple-resonance excitation of a composite metamaterial[J]. Applied Physics Letters, 2011,99(19):191909. doi:10.1063/1.3660273.
- [ 14 ] SHIROKOFF E, BARRY P S, BRADFORD C M, et al. MKID development for SuperSpec: an on-chip, mm-wave, filter-bank spectrometer[C]// Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VI. Proceedings of

- SPIE—The International Society for Optical Engineering. Amsterdam, Netherlands:[s.n.], 2012:1–11. doi:10.1117/12.927070.
- [15] EBLABLA A M, LI Xu, WALLIS D J, et al. GaN on low-resistivity silicon THz high-Q passive device technology[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2016,7(1):93–97. doi:10.1109/TTHZ.2016.2618751.
- [16] DING Jiangqiao, HU Jie, SHI Shengcai. 350 GHz bandpass filters using superconducting coplanar waveguide[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2021,11(5):1. doi:10.1109/TTHZ.2021.3071019.
- [17] LEONG K M K H, HENNIG K, ZHANG Chunbo, et al. WR-1.5 silicon micromachined waveguide components and active circuit integration methodology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012,60(4):998–1005. doi:10.1109/TMTT.2012.2184296.
- [18] SHANG Xiaobang, KE Maolong, WANG Yi, et al. WR-3 band waveguides and filters fabricated using SU-8 photoresist micromachining technology[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2012,2(6):629–637. doi:10.1109/TTHZ.2012.2220136.
- [19] STANEC J R, BARKER N S. Fabrication and integration of micromachined submillimeter-wave circuits[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2011,21(8):409–411. doi:10.1109/LMWC.2011.2158411.
- [20] KOLLER D, BRYERTON E W, HESLER J L. WM380(675–700 GHz) bandpass filters in milled, split-block construction[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2018,8(6):630–637. doi:10.1109/TTHZ.2018.2873114.
- [21] 许广阳, 赵芸, 陈垚, 等. W波段单E面耦合宽带波导滤波器[J]. 微波学报, 2021,37(3):60–64. (XU Guangyang, ZHAO Yun, CHEN Yao, et al. W-band broadband waveguide filter with single E-plane coupling[J]. Acta Microwave, 2021,37(3):60–64.) doi:10.14183/j.cnki.1005–6122.202103013.
- [22] XU Jing, DING Jiangqiao, ZHAO Yun, et al. W-band broadband waveguide filter based on *H*-plane offset coupling[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2019,40(4):412–418. doi:10.1007/s10762–019–00571–7.
- [23] LIAO Xiaoyi, WAN Lei, YIN Yong, et al. W-band low-loss bandpass filter using rectangular resonant cavities[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2014,8(15):1440–1444. doi:10.1049/iet-map.2014.0252.
- [24] 熊阳, 裴乃昌, 何毅龙, 等. 一种低插入损耗的180 GHz腔体滤波器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(2):181–184. (XIONG Yang, PEI Naichang, HE Yilong, et al. A 180 GHz cavity filter with low insertion loss[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(2):181–184.) doi:10.11805/TKYDA2020085.
- [25] ZHUANG Jianxing, HONG Wei, HAO Zhangcheng. Design and analysis of a terahertz bandpass filter[C]// 2015 IEEE International Wireless Symposium(IWS 2015). Shenzhen, China:IEEE, 2015:1–4. doi:10.1109/IEEE-IWS.2015.7164597.
- [26] ZHANG Naibo, SONG Ruiliang, HU Mingjun, et al. A low-loss design of bandpass filter at the terahertz band[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018,28(7):573–575. doi:10.1109/LMWC.2018.2835650.
- [27] DING Jiangqiao, LIU Dong, SHI Shengcai, et al. W-band quasi-elliptical waveguide filter with cross-coupling and source-load coupling[J]. Electronics Letters, 2016,52(23):1960–1961. doi:10.1049/el.2016.3245.
- [28] DING Jiangqiao, SHI Shengcai, ZHOU Kang, et al. Analysis of 220 GHz low-loss quasi-elliptic waveguide bandpass filter[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017,27(7):648–650. doi:10.1109/LMWC.2017.2711544.
- [29] LEAL-SEVILLANO C A, MONTEJO-GARAI J R, RUIZ-CRUZ J A, et al. Low-loss elliptical response filter at 100 GHz[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2012,22(9):459–461. doi:10.1109/LMWC.2012.2212237.
- [30] SHANG Xiaobang, LANCASTER M, DONG Yuliang. W-band waveguide filter based on large TM<sub>120</sub> resonators to ease CNC milling[J]. Electronics Letters, 2017,53(7):488–490. doi:10.1049/el.2016.4131.
- [31] ZHOU Kang, DING Jiangqiao, ZHOU Chunxia, et al. W-band dual-band quasi-elliptical waveguide filter with flexibly allocated frequency and bandwidth ratios[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018,28(3):206–208. doi:10.1109/LMWC.2018.2796840.
- [32] XIAO Yu, SHAN Peizhe, ZHU Kaiqiang, et al. Analysis of a novel singlet and its application in THz bandpass filter design[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2018,8(3):312–320. doi:10.1109/TTHZ.2018.2823541.
- [33] WU Yiwen, HAO Zhangcheng, LU Rong, et al. A high-selectivity D-band mixed-mode filter based on the coupled overmode cavities[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020,68(6):2331–2342. doi:10.1109/TMTT.2020.2977903.
- [34] WANG Jie, ZHAO Yun, DING Jiangqiao. 400 GHz easy-packaging waveguide filters based on mixed-mode and off-axis couplings[J]. IEEE Access, 2021(9):76642–76648. doi:10.1109/ACCESS.2021.3082569.
- [35] LEAL-SEVILLANO C A, MONTEJO-GARAI J R, KE Maolong, et al. A pseudo-elliptical response filter at W-band fabricated with thick SU-8 photo-resist technology[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2012,22(3):105–107. doi:10.1109/LMWC.2012.2183861.
- [36] SHANG Xiaobang, KE Maolong, WANG Yi, et al. Micromachined W-band waveguide and filter with two embedded H-plane



- bends[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2011, 5(3):334–339. doi:10.1049/iet-map.2010.0272.
- [37] SHANG Xiaobang, KE Maolong, WANG Yi, et al. Micromachined WR-3 waveguide filter with embedded bends[J]. Electronics Letters, 2011, 47(9):545–547. doi:10.1049/el.2011.0525.
- [38] CHEN Qi, SHANG Xiaobang, TIAN Yingtao, et al. SU-8 micromachined WR-3 band waveguide bandpass filter with low insertion loss[J]. Electronics Letters, 2013, 49(7):480–482. doi:10.1049/el.2013.0277.
- [39] YANG Hao, DHAYALAN Y, SHANG Xiaobang, et al. WR-3 waveguide bandpass filters fabricated using high precision CNC machining and SU-8 photoresist technology[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2017, 8(1):100–107. doi:10.1109/TTHZ.2017.2775441.
- [40] SHANG Xiaobang, TIAN Yingtao, LANCASTER M J, et al. A SU8 micromachined WR-1.5 band waveguide filter[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2013, 23(6):300–302. doi:10.1109/LMWC.2013.2260733.
- [41] GUO Cheng, DHAYALAN Y, SHANG Xiaobang, et al. A 135–150 GHz frequency tripler using SU-8 micromachined WR-5 waveguides[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 68(3):1035–1044. doi:10.1109/TMTT.2019.2955684.
- [42] BEUERLE B, CAMPION J, SHAH U, et al. A very low loss 220–325 GHz silicon micromachined waveguide technology[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2018, 8(2):248–250. doi:10.1109/TTHZ.2018.2791841.
- [43] ZHAO Xinghai, BAO Jinfu, SHAN Guangcun, et al. D-band micromachined silicon rectangular waveguide filter[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2012, 22(5):230–232. doi:10.1109/LMWC.2012.2193121.
- [44] ZHAO Xinghai, SHAN Guangcun, DU Yijia, et al. G-band rectangular waveguide filter fabricated using deep reactive ion etching and bonding processes[J]. Micro & Nano Letters, 2012, 7(12):1237–1240. doi:10.1049/mnl.2012.0567.
- [45] VAHIDPOUR M, SARABANDI K. Micromachined J-band rectangular waveguide filter[C]// 2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium. Istanbul, Turkey: IEEE, 2011:1–4. doi:10.1109/URSIGASS.2011.6050631.
- [46] HU Jiang, XIE Shanyi, ZHANG Yong. Micromachined terahertz rectangular waveguide bandpass filter on silicon-substrate[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2012, 22(12):636–638. doi:10.1109/LMWC.2012.2228179.
- [47] LEAL-SEVILLANO C A, RECK T J, JUNG-KUBIAK C, et al. Silicon micromachined canonical *E*-plane and *H*-plane bandpass filters at the terahertz band[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2013, 23(6):288–290. doi:10.1109/LMWC.2013.2258097.
- [48] TANG Hongjun, HONG Wei, YANG Guangqi, et al. Silicon based THz antenna and filter with MEMS process[C]// International Workshop on Antenna Technology (IWAT). Hong Kong, China: IEEE, 2011:148–151. doi:10.1109/IWAT.2011.5752383.
- [49] ZHUANG Jianxing, HAO Zhangcheng, HONG Wei. Silicon micromachined terahertz bandpass filter with elliptic cavities[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2015, 5(6):1040–1047. doi:10.1109/TTHZ.2015.2480844.
- [50] LIU Shuang, HU Jiang, ZHANG Yong, et al. 1 THz micromachined waveguide band-pass filter[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2016, 37(5):435–447. doi:10.1007/s10762-015-0229-6.
- [51] GLUBOKOV O, ZHAO Xinghai, CAMPION J, et al. Investigation of fabrication accuracy and repeatability of high-Q silicon-micromachined narrowband sub-THz waveguide filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(9):3696–3706. doi:10.1109/TMTT.2019.2926244.
- [52] GLUBOKOV O, ZHAO Xinghai, CAMPION J, et al. Micromachined filters at 450 GHz with 1% fractional bandwidth and unloaded *Q* beyond 700[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2018, 9(1):106–108. doi:10.1109/TTHZ.2018.2883075.
- [53] SONG S, SEO K S. A W-band air-cavity filter integrated on a thin-film substrate[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2009, 19(4):200–202. doi:10.1109/LMWC.2009.2015492.
- [54] LEAL-SEVILLANO C A, PISANO G, MONTEJO-GARAI J R, et al. Development of low loss waveguide filters for radio-astronomy applications[J]. Infrared Physics & Technology, 2013(61):224–229. doi:10.1016/j.infrared.2013.08.012.
- [55] STANEC J R, BARKER N S. Fabrication and integration of micromachined submillimeter-wave circuits[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2011, 21(8):409–411. doi:10.1109/LMWC.2011.2158411.
- [56] SHANG Xiaobang, PENCHEV P, GUO Cheng, et al. W-band waveguide filters fabricated by laser micromachining and 3-D printing[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(8):2572–2580. doi:10.1109/TMTT.2016.2574839.